Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos
Laboratório Avançado de Física

INTERFERÔMETRO DE MICHELSON

Os interferômetros conhecidos são convenientemente divididos em duas classes: uns baseados na divisão da frente de onda e outros baseados na divisão da amplitude, o interferômetro de Michelson corresponde a esta segunda classe. No interferômetro de Michelson a luz que vem de uma fonte extensa é dividida em duas partes por um divisor de feixe (semi-espelho), mantendo-se a frente de onda, mas com amplitude reduzida. Após a divisão, os dois feixes de luz são refletidos por dois espelhos planos altamente refletores e polidos, juntando-se novamente para formar franjas de interferência, conforme observamos na figura 1. As partes principais do interferômetro são os dois espelhos planos M_1 e M_2 (um destes é móvel e o outro permanece fixo) e as placas planas paralelas de vidro B e C com espessuras iguais, sendo B o semi-espelho e C o compensador. O interferômetro determina a diferença de caminho ótico. Como o caminho ótico é o produto do índice de refração *n* vezes o caminho geométrico *d*, é possível medir o caminho ótico *d*. Ou vice versa, se o caminho *d* é conhecido então é possível determinar o índice de refração *n*. O interferômetro, portanto pode ser usado para determinar:

1. Caminho geométrico
2. Caminho ótico
3. Índice de refração

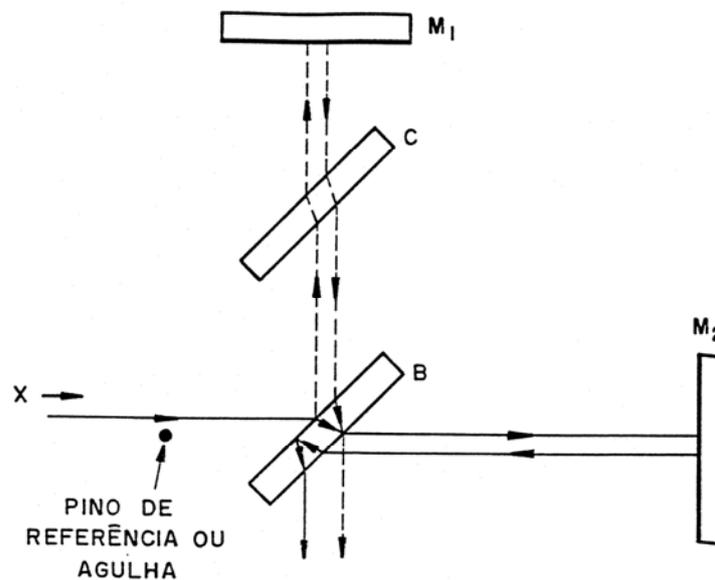



Figura 1: Esquema do interferômetro de Michelson.

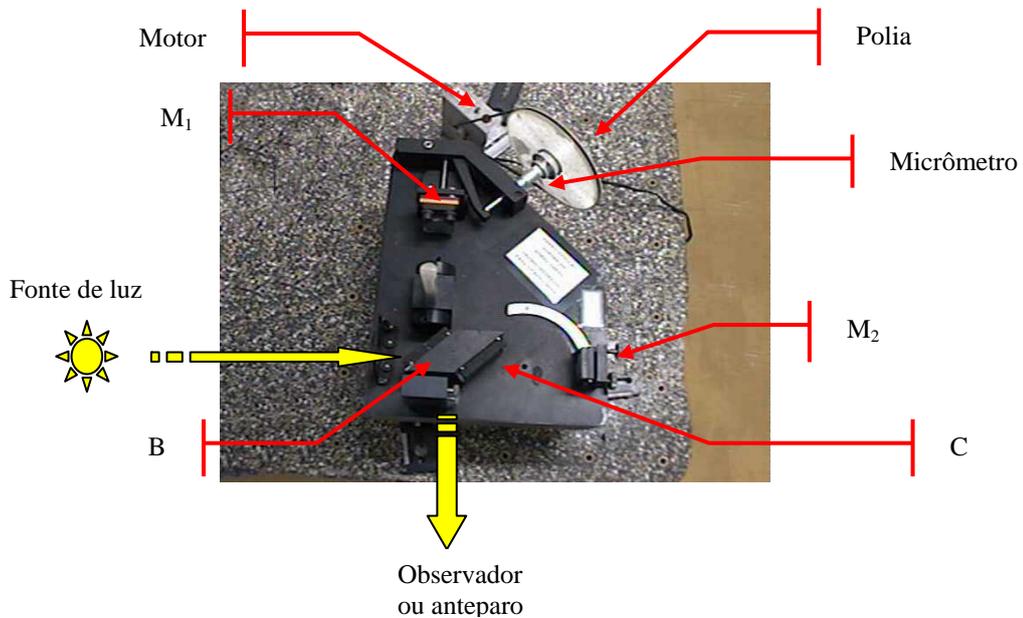



Figura 2: Interferômetro de Michelson utilizado

A obtenção do padrão de interferência será possível pelo alinhamento adequado dos espelhos, o tipo de fonte de luz utilizado e a separação relativa entre os dois braços do interferômetro.

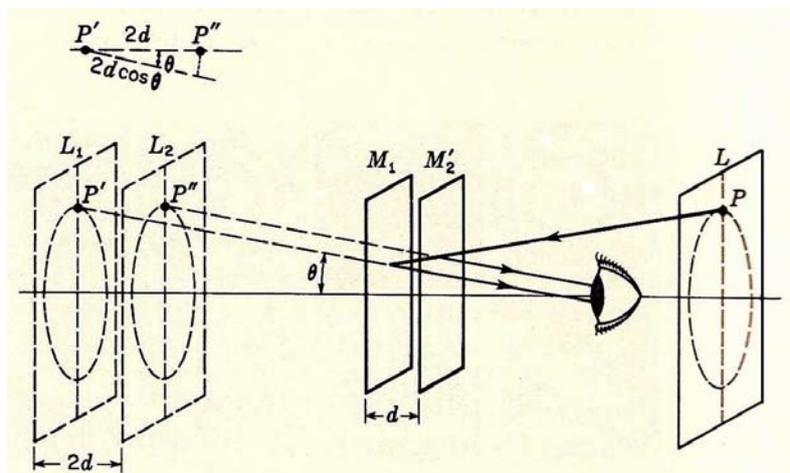



Figura 3 representação da formação das franjas de interferência ou interferograma

Na figura 3 o espelho real M_2 é substituído por sua imagem virtual M_2' formada por reflexão no semi-espelho *B*, conseqüentemente M_2' está paralelo a M_1. Devido às múltiplas reflexões podemos pensar que a fonte extensa está em *L*, atrás do observador, e formando duas imagens virtuais L_1 e L_2 em M_1 e M_2'. Nesse caso as fontes virtuais são coerentes. Se *d* é a separação M_1M_2', as fontes virtuais estarão separadas por uma distância *2d*. Se *d* é igual a um número inteiro de meio comprimento de onda, i.e. a diferença de caminho *2d* igual a um número inteiro de comprimentos de onda, todos os raios refletidos normal aos espelhos estarão em fase. A diferença de caminho entre dois raios que vem de *P'* e *P''* é *2d* cosθ, como mostra a figura. Sendo assim teremos que a condição para interferência construtiva deve ser:

$$2d\cos\theta = m\lambda$$

Objetivos

- Compreender o funcionamento do interferômetro. Princípios de interferência, coerência da luz.
- Determinar a constante de proporcionalidade entre o deslocamento do micrômetro e o espelho móvel, utilizando um laser de HeNe.
- Determinar o comprimento de onda da linha verde de Hg
- Determinar a separação do dubleto de Na.
- Observar a variação do índice de refração de um gás (He) ou Ar em função da pressão. Lei de Gladstone.

Aparelhagem

1 interferômetro de Michelson
1 pino para ajuste de imagem (pino de referência)
1 sistema de detecção e contagem de franjas de interferência
1 manômetro de Hg
1 célula para gás
1 sistema de vácuo
Lentes, lunetas e suportes ópticos
Varias fontes de luz (sódio, mercúrio, incandescente, laser He-Ne)

Procedimento de alinhamento (veja também manual de instruções do fabricante em outros equipamentos, pois existem 2 ou mais diferentes no laboratório).

Posicione o espelho M_1, deslocando-o com o micrômetro, até que a distância ao separador de feixe B seja aproximadamente igual (dentro de 1 mm) à distância do espelho M_2 ao separador de feixe B, isto é, B fica eqüidistante de M_1 e M_2. Faça as medidas das distâncias desde as bordas superiores dos espelhos e do separador de feixe, tomando cuidado em não tocar nas superfícies dos espelhos. Alinhe os espelhos para uma perpendicularidade exata entre si. Ajuste a fonte de luz (laser HeNe, por exemplo) com um difusor (atenuador de intensidade de luz) de maneira que o feixe incida com um ângulo de 45º sobre o separador de feixe B. Observe a imagem do pino de referência situado entre a fonte de luz e o separador de feixe,. Poderá observar duas imagens, uma que vem da reflexão da superfície frontal do separador de feixe B e a outra que vem da superfície refletora posterior. Alinhe a posição vertical da imagem do pino ajustando os parafusos do espelho M_2. Os parafusos do espelho M_1 alinharão as imagens do pino horizontalmente. Quando chegarem a se observar todas as imagens do pino superpostas numa, poderá se observar franjas de interferência circulares, isto requer alguma prática para obter as franjas.

Eventualmente não há necessidade de usar o pino de referencia, basta usar o laser sem o difusor e projetar a imagem dada pelos dois espelhos num anteparo, **tome cuidado para não ficar olhando na frente do laser**. Faça o procedimento indicado anteriormente como indicado com a utilização do pino. Em resumo, observará duas imagens vindas de cada espelho, procure alinhar as duas imagens até dar a superposição e verá o padrão de interferência. As franjas podem ser mais tarde ajustadas nitidamente através dos parafusos. O ajuste pode ser feito numa mesa muito estável sem vibrações.

Experimento 1

Determinação do coeficiente K de proporcionalidade entre o deslocamento do espelho e o deslocamento acoplado do micrômetro.

Monte o interferômetro em conjunto com um laser de HeNe conforme a figura 1. No presente caso é conveniente projetar a interferograma num anteparo. Após alinhamento com a fonte de laser HeNe(λ = 632,8nm) e obtido o padrão de interferência no anteparo e utilizando o sistema de detecção e contagem de franjas. Realize sucessivas medidas periódicas, num sentido de avanço do micrômetro, de 100 em 100 contagens de franjas registrando o valor da leitura do micrômetro (D_i's) para cada período. Faça pelo menos de 5 a mais seqüências periódicas, o suficiente para levantar um gráfico do número de franjas contra leitura D. Usando a equação 1 é possível determinar o valor de K a partir dos dados do gráfico.

Verifique o valor de K com o manual de instruções do interferômetro.

Experimento 2

Determinação do comprimento de onda de uma luz monocromática.

a) Fonte de laser de HeNe (λ = 632,8nm)

Após que o interferômetro estiver alinhado (bom padrão de franjas), tome uma leitura do micrômetro. Virando o micrômetro, o suporte do espelho M_1 se movimentará lentamente. Conte as franjas à medida que vão passando através do pino de referência ou à medida que vão aparecendo ou desaparecendo no centro do padrão de interferência. Para uma precisão satisfatória poderá contar de 50 a 100 franjas ou mais. Tome a nova leitura do micrômetro. Agora podemos determinar o comprimento de onda da luz monocromática, utilizando o valor de K determinado no passo anterior já que:

$$\Delta m\lambda = 2(d_1 - d_2) = 2K(D_1 - D_2) \qquad (1)$$

$$\lambda = \frac{2K(D_1 - D_2)}{\Delta m}$$

Onde $d_1 - d_2$ é a distância de deslocamento do espelho M_1, $D_1 - D_2$ é a diferença de leitura no micrômetro e K a razão do movimento do suporte do espelho M_1 à leitura do micrômetro.

Outra alternativa de medidas é fazer um gráfico da equação (1) em intervalos de Δm em que os d's sejam mensuráveis e obter λ por regressão linear, como sugerido no experimento 1.

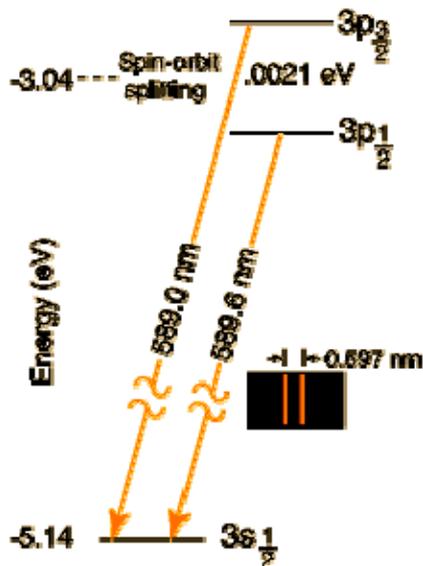
b) Fonte de luz de Mercúrio filtrada

Repita a experiência, mas usando uma lâmpada de Mercúrio de baixa pressão. Use um filtro verde (546nm). **Não olhe diretamente para o feixe da lâmpada sem ter colocado o filtro** que pode danificar permanentemente seus olhos por exposição excessiva a radiação UV da lâmpada de Hg. No presente caso por ser uma lâmpada de descarga de gás de Hg ela apresenta uma luz dispersa não colimada, e relativamente fraca em relação ao feixe colimado de um laser, não podendo ser adequadamente projetada num anteparo. Use uma luneta para ver as franjas. Para conseguir um bom padrão de interferência é necessário colimar o feixe da lâmpada com uma lente apropriada, de maneira que uma maior parte do separador de feixe seja preenchida.

Devido ao tipo de lâmpada de Mercúrio, sugere-se muito cuidado na observação das franjas de interferência. Recomenda-se usar um diafragma para sua observação direta, atenuando sua intensidade. Caso haja muita dificuldade em encontrar o interferograma, sugerimos voltar a

realizar o alinhamento conforme o experimento 1, e sem mexer no alinhamento trocar o laser pela lâmpada e eventualmente realinhar a lente, conforme for o caso.

<u>Experimento 3</u>

<u>Medida da separação do dubleto de Sódio.</u>

O dubleto de Sódio consiste de duas linhas espectrais amarelas, com λ_1 = 5890Å e λ_2 = 5896Å, corresponde às transições $^3P_{3/2}$ => $^3S_{1/2}$ e $^3P_{1/2}$ => $^3S_{1/2}$ respectivamente. A linha de 5890Å é duas vezes mais intensa que a linha de 5896Å.

Com uma fonte de luz de Sódio formamos o padrão de franjas. Vemos realmente agora dois conjuntos de padrão de interferência, formadas com cada uma das linhas do dubleto. Manualmente movimente o espelho M_1 e observe que as franjas amarelas passam alternadamente de uma condição de alto contraste com outra de quase um desaparecimento total de contraste. Esta última condição aparece quando um conjunto de franjas de λ_1 fica no meio do caminho do outro conjunto de franjas de λ_2. Fixe o espelho nesta condição e tome uma leitura do micrômetro. Novamente movimente o espelho até a próxima condição de quase desaparecimento total de contraste, tome novamente a leitura do micrômetro. Repita várias vezes esse tipo de medidas, sempre no mesmo sentido de deslocamento do espelho, e calcule o valor médio da distância *d* entre as condições de desaparecimento total de contraste.

No primeiro desaparecimento temos

$$2d_1 = m_1\lambda_1 = (m_1 + n + 1/2)\lambda_2 .....(\lambda_1 > \lambda_2) \qquad (2)$$

para o segundo desaparecimento temos:

$$2d_2 = m_2\lambda_1 = (m_2 + n + 3/2)\lambda_2 \qquad (3)$$

e finalmente

$$2(d_2 - d_1) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \qquad (4)$$

Como λ_1 e λ_2 são próximos:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \qquad (5)$$

O valor médio de λ poderá ser determinado como da experiência 1 e $d = K(D_2 - D_1)$. Compare seus resultados com os valores da literatura.

<u>Experimento 4</u>

<u>Medida do índice de refração de um gás.</u>

<u>Aparelhagem</u>

- Tudo quanto foi usado nos experimentos 1 e 2

- Uma célula para gás
- Uma bomba rotativa de vácuo
- Um manômetro
- Uma válvula tipo agulha ou semelhante
- Conexões para vácuo

Procedimento

Monte a célula para gás num dos braços do interferômetro e faça as conexões necessárias para evacuar a célula e introduza um gás lentamente na célula a uma pressão conhecida.

O índice de refração n do gás estará dado então por

$$2(n-1)t = \lambda \Delta N \tag{6}$$

Onde t é o caminho geométrico através da célula. Evacue o sistema e alinhe o interferômetro para ter um bom padrão de franjas de interferências. Feche a válvula e introduza lentamente ar seco usando a válvula tipo agulha e conte o número de franjas que se movimentam, registrando ao mesmo tempo a pressão indicada pelo manômetro.

Suponha que a densidade do gás seja uma função linear da pressão, verifique num gráfico a linearidade da lei de Gladstone:

$$\frac{n-1}{\rho} = A = cte. \tag{7}$$

E calcule o índice de refração do ar em condições normais, isto é, T = 0°C e P = 760 mm de Hg. Compare com os valores dados na literatura. Concordam suas medidas, dentro dos limites de erro que você estimou? Se não, por quê? Para isso lembre que a lei de Gladstone é linear e que a teoria cinética de um gás perfeito (onde o ar cumpriria com essa lei) mostra que a pressão constante, a densidade ρ é inversamente proporcional à temperatura absoluta do gás.

Perguntas

1- Justifique a equação 1, escrevendo a condição para ter interferência construtiva.
2- Discuta o uso do interferômetro de Michelson para calibração de um metro padrão de comprimento em termos do comprimento de onda do Kriptônio 86 usado como padrão de comprimento.
3- Discuta a experiência de Michelson-Morley e sua função na teoria especial da relatividade.
4- Qual é o propósito do uso do compensador C?
5- Descreva a montagem de um interferômetro de microondas.
6- Por que é mais fácil conseguir as franjas de interferência com uma fonte de laser ao invés de uma fonte convencional?
7- Comente outros tipos de interferômetros.
8- Conhece algum outro método para medir o comprimento de onda da luz?
9- Que outros tipos de medida pode-se fazer com um interferômetro?
10- Comente a variação do índice de refração com o comprimento de onda.
11- Compare em termos de poder de resolução entre os dois interferômetros Fabry-Perot e Michelson.

Referências

1. Jenkins & White, “Fundamentals of Optics”, Ed. Mc. Graw-Hill. Biblioteca do IFSC.
2. Max Nborn & Emil Wolf, “Principles of Otics”, Ed. Pergamon Press. Biblioteca do IFSC.
3. M. Françon, “Optical Interferometry”, Ed. Academic Press (1966). Biblioteca do IFSC.

4. Jurgen R. Meyer – Arendt, “Classical and Modern Optics”, Ed. Prentice Hall. Biblioteca do IFSC.

Versão atualizada de outras apostilas: M. A. Aegerter, M. Siu Li

apmichelson-20080125.doc 2008